中国生态农业学报 2016 年 5 月 第 24 卷 第 5 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, May 2016, 24(5): 553−562

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.151278

山西省农牧生产体系磷流动空间变异特征*

张建杰[1] 郭彩霞[1] 张一弓[2] 张 强[1**]

(1. 山西省农业科学院农业环境与资源研究所 太原 030031; 2. 山西省农业科学院 太原 030031)

摘 要 为揭示山西省农牧生产体系磷流动空间分布特征, 进一步为养分资源综合管理提供科学建议, 本研究使用食物链养分流动模型(NUFER)与 ArcGIS 相结合, 以 2011 年山西省 11 个地市农牧生产体系为研究对象, 计算了农牧生产体系中的磷流动、损失及账户平衡, 并对各个生产体系的磷利用效率(PUE)、有机废弃物中磷的循环利用效率、磷的损失途径等重要指标进行了综合评价, 描述了 2011 年山西省各地市农牧生产体系与区域尺度的磷流动变化特征。研究结果表明, 山西省各地市农牧体系磷的投入和损失差异较大, 农田生产体系投入范围在 22.5~83.0 kg·hm^{-2}, 而整个农牧生产体系损失区间在 2.7~8.8 kg·hm^{-2}; 磷的投入和损失均总体呈现东南部高、西北部低的空间分布格局; 各地市农田磷素均有盈余但程度不均, 为 9.4~48.4 kg·hm^{-2}。农田生产系统的磷素利用效率(PUEc)高于全国平均水平; 农牧生产体系的磷利用效率(PUEc+a)较低, 全省平均水平仅为 30.3%, 主要是由于农牧分离较为严重; 有机废弃物的循环利用效率较低(60%)。省域东南部存在潜在环境风险, 晋城、晋中等地市有大量的粪尿磷未得到回收利用, 可作为周边农业主产区的农田养分资源。因此通过提高农牧生产体系的养分管理水平和区域间养分资源协同管理, 能够大幅提高磷的利用效率, 同时有效降低环境风险, 实现山西农业可持续发展。

关键词 农牧生产体系 磷流动 磷利用效率 NUFER 模型

中图分类号: S19; S158.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)05-0553-10

Spatial characteristics of phosphorus flow in crop-livestock production systems in Shanxi, China*

ZHANG Jianjie[1], GUO Caixia[1], ZHANG Yigong[2], ZHANG Qiang[1**]

(1. Institute of Agricultural Environment and Resources, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030031, China; 2. Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030031, China)

Abstract A quantitative understanding of phosphorus (P) flow, loss and use efficiency is critical for improving the productivity and sustainability of agriculture while minimizing environment impact. However, most studies have focused primarily on either crop systems or livestock systems. Hence the analysis of P flow in integrated crop-livestock production systems has been largely lacking and the spatial characteristics of P flow has not been entirely known. Here, we quantified P flow, loss and use efficiency (PUE) in crop-livestock production systems in Shanxi Province, China, using the NUFER (nutrient flows in food chain, environment and resources use) simulation model and ArcGIS. We collected the data from a statistical database in 2011, consisting of 11 municipalities in Shanxi Province, to explore the spatial characteristics of P flow in the crop-livestock systems and propose scientific regional nutrient management. Our results showed large variations in P

* 山西省科技基础条件平台建设项目(2014091003-1010)、农业部公益性行业(农业)科研专项(201103003)、山西省青年科技研究基金(2014021031-1)和山西省农业科学院科技攻关项目(YGG1507)资助

** 通讯作者: 张强, 研究方向为养分资源管理。E-mail: sxsnkytfs@163.com
张建杰, 研究方向为区域养分资源管理。E-mail: zhangjianjie@yeah.net

收稿日期: 2015−12−01 接受日期: 2015−12−31

* This study was supported by the Science and Technology Platform Construction Project of Shanxi Province (No. 2014091003-1010), the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest (No. 201103003), the Natural Science Foundation for Yong Scientists of Shanxi Province (No. 2014021031-1), and the Program for Science and Technology Development of Shanxi Academy of Agricultural Sciences (No. YGG1507).

** Corresponding author, E-mail: sxsnkytfs@163.com

Received Dec. 1, 2015; accepted Dec. 31, 2015

input and loss under crop/livestock systems in different cities of Shanxi Province. P input under crop production system was within 22.5–83.0 kg·hm^{-2} and P loss under crop-livestock system was within 2.7–8.8 kg·hm^{-2}. Both P input and loss were significantly higher in the southeast than in the northwest regions. For crop systems, surplus P was within 9.4–48.4 kg·hm^{-2}, which largely varied with region. PUE under crop systems (PUEc) in Shanxi was 45.6%, significantly higher than the national average (37.0%). Then PUE under livestock system (PUEa) was low (7.6%), mainly because of the large amount of draught cattle in livestock systems (581×10^3 heads). As a result, PUE under crop-livestock systems (PUEc+a) was relatively low (30.3%). This was mainly due to the separation between crop and livestock systems and the resulting low recycling rate of P (< 60%) from animal excreta and crop residues to croplands. Spatially, the southeast region had the largest potential risks of environmental pollution. Hence there was an urgent need to improve P management in crop-livestock production systems in the province. Large amounts of animal manure were not recycled and reused in Jincheng and Jinzhong, which could be used as nutrient input in croplands. In conclusion, PUE in crop-livestock systems in Shanxi Province was relatively low. This was in part due to the separation and de-coupling of crop and livestock systems within regions. It also related to the specialization of crop and livestock production in various regions, which resulted in large spatial variations. P loss under crop production systems was large in the south than in the north. There was also a large room for animal manure recycling. Hence significant improvements in P management were realizable via optimizing P flow between crop and livestock systems, and also via improving P flow among regions. P management needed optimization in crop-livestock production systems and among regions to significantly improve PUE at large scale and production system scale. This significantly reduced the risk of environmental pollution and ensured sustainable development.

Keywords Crop-livestock production system; Phosphorus flow; Phosphorus use efficiency; NUFER model

磷是满足动植物和人类生长的必要营养元素，与氮相比，在生物圈磷是更为稀缺的元素[1]。据估计，如果不施用磷肥，粮食产量将难以满足 2050 年全球 90 亿人口的需求[2]。中国是世界上最大的磷肥消费国家[3]，近些年随着磷在农田生态系统投入量的不断增加，已经引起了资源浪费、环境质量下降和影响人体健康等一系列问题，磷在土壤中的累积不断增加[4]，并通过淋洗、径流和侵蚀等方式进入到水体，造成江河湖泊的富营养化和生物多样性的丧失[5]。同样中国是全球最大的畜禽养殖国家，每年有大量的畜禽粪尿产生[6]，伴随着畜禽养殖集约化程度的提高，导致农牧分离，大量畜禽粪尿资源不能及时返回农田生产系统，造成粪尿养分的流失和一系列环境问题[7]。在国家层面上，国务院制定了《畜禽规模化养殖污染防治条例》[8]，以期对规模化养殖过程中畜禽粪尿的环境排放进行规范和约束。因此，揭示区域尺度农牧生产系统中磷的空间流动规律，分析其存在的问题并提出对策，对于实现区域养分资源综合管理，提高磷的利用效率，保护环境具有现实的科学指导意义。

已有学者借鉴物质流分析(material flow analysis, MFA)的思想[9]，在国家尺度上研究了农田生产系统的养分流动和利用效率[10]，畜牧业生产的磷的流动和账户平衡[11]，借助于模型和物质流分析的方法，在区域尺度上研究了氮素在食物生产–消费系统的流动[12]。Ma 等[13]在基于物质流分析的理念基础之上，构建了食物链养分流动模型(NUFER，nutrient flows in food chains, environment and resources use)，这是中国第一个能在国家和区域尺度对氮、磷在“农田–畜牧–食品加工–家庭消费”环节的流动、利用效率和损失途径进行定量描述的模型。此后，Hou 等[14]在国家尺度研究了中国食物链的氮、磷利用效率和损失，并分析了驱动因素；Bai 等[15]研究了中国生猪生产体系中的氮磷利用效率和损失情况，并通过情景分析对 2030 年的氮磷养分管理提出了优化建议。Ma 等[16]定量研究了北京在城镇人口急剧增长的背景下，“食物生产–消费”系统下氮磷流动的特征，揭示了存在的问题并提出了对策。然而，对于省域尺度农牧生产系统内部磷的流动变化特征的研究甚少。为此，本研究通过整理年鉴数据、挖掘文献资料、实地调研和专家咨询等方式，将 NUFER 模型和 ArcGIS 结合使用，系统、全面地研究山西省农牧生产体系中磷流动的空间变化特征，为今后实现养分资源的宏观调控提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

山西省是内陆省份，位于黄河中游东岸，华北平原西面的黄土高原上，东经 110°14′~114°33′、北纬 34°34′~40°24′，全省国土面积 15.6 万 km^2。地势东北高西南低，海拔从 180 m 到 3 061.1 m。山西属温带大陆性季风气候，南北和垂直差异明显。气候特征

是冬季漫长，寒冷干燥；夏季南长北短，雨水集中；春季气候多变，风沙较多；秋季短暂，天气温和。全省日照充足，昼夜温差较大；热量资源较丰富；灾害性天气较多，有“十年九旱”的说法。土壤类型以褐土为主，占全省面积的 49.8%，另外还分布有栗褐土、粗骨土、黄绵土和潮土等[17]。大同、忻定、太原、临汾和运城盆地是山西省的主要农作区，主要粮食作物有玉米、小麦、高粱、谷子、豆类和薯类作物；经济作物有棉花、烟叶、甜菜、胡麻等。近年来，山西省政府高度重视畜牧业发展，山西的畜牧业正在由过去的“家庭养殖”向规模化、集约化模式转变，到 2014 年山西畜牧产业规模化水平已经达到 47%，高于全国平均水平 11 个百分点[18]。

1.2　NUFER 模型及系统的界定

NUFER 模型是一个国家和区域尺度食物链系统氮磷流动模型，可以定量分析“农田–畜牧–食品加工–家庭消费”系统氮磷流动、利用效率和损失途径。本研究以山西省“农田–畜牧”生产体系为研究边界，系统间磷素流动为研究对象(图 1)，研究单元为山西省的 11 个地市。

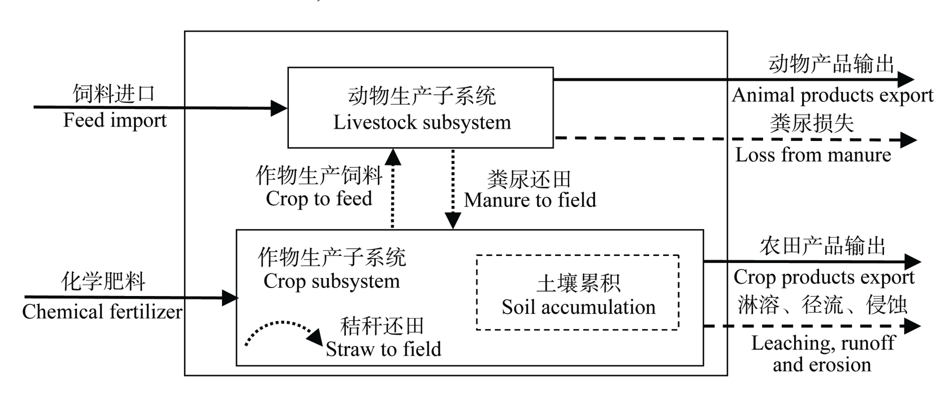


图 1　农牧生产体系磷流动模型框架

Fig. 1　Demonstration of P flow model in crop-livestock production system

左侧实线箭头为输入项目，框内虚线箭头为系统内部循环项；右侧实线箭头为输出项，短划线箭头为环境损失项。On the left side, solid line arrows represent phosphorus inputs. In the middle box, dotted line arrows represent phosphorus recycling inner the system. On the right side, solid line arrows represent phosphorus products output, dash line arrows represent phosphorus losses.

1.3　模型算法

对于农牧生产体系的磷流动模型，系统中磷的投入有化肥和系统外动物饲料进口 2 部分；输出项包括作物主产品(籽粒)和副产品(秸秆)等带走的磷，动物主产品(肉、蛋、奶)和副产品(动物活体)带走的磷；磷的损失主要包括农田土壤的淋溶、地表的径流以及土壤侵蚀，以及来自动物粪尿的堆置损失等；在系统内部，涉及到磷在农业生产子系统和动物生产子系统相互之间的循环流动，农田生产子系统的秸秆还田，作物产品作为动物饲料进入动物生产系统，以及动物粪尿作为养分资源进入农田生产系统，见图 1。

1)农田生产系统磷流动计算方法

农田生产系统磷输入量=化学磷肥投入量+作物秸秆还田量+畜禽粪尿还田量　(1)

其中：

作物秸秆还田量=作物秸秆收获磷量×秸秆还田比例　(2)

畜禽粪尿还田量=畜禽养殖数量×单位动物畜禽粪尿排磷量×粪尿还田比例　(3)

2)畜牧生产子系统磷流动计算方法

系统内饲料磷投入量=籽粒收获磷量×饲用比例+秸秆收获磷量×饲用比例　(4)

系统外饲料磷投入量=动物子系统磷需求量(畜牧主产品带走磷量+动物活体带走磷)–本地饲料磷投入量　(5)

3)磷利用效率的计算

农田系统磷利用效率(PUEc):

PUEc=作物主产品磷素量/农田子系统磷素总投入×100%　(6)

畜牧系统磷利用效率(PUEa):

PUEa=动物主产品磷素量/畜牧子系统磷素总投入×100%　(7)

农牧系统磷素综合利用效率(PUEc+a):

PUEc+a=(作物主产品磷素量+动物主产品磷素量–作物主产品进入动物生产系统的磷素量)/农牧系统磷素总投入×100%　(8)

1.4　数据来源

本研究所需基础数据包括 2011 年山西省各地市耕地数量、主要农作物播种面积及产量、畜牧业生产情况等来源于山西省统计年鉴[19]，分地市肥料用量来自 2011 年山西省农业统计年鉴。计算过程中涉及单位农产品(粮食籽粒、蔬菜和水果)含氮量，主要农作物的草谷比(表 1)来源于李书田等[20]的研究结果；

表 1 不同作物的草谷比及收获物和秸秆的含磷量[20]
Table 1 Ratio of straw to grain and P contents in crop products and straws

作物 Crop	草/谷比 Straw/grain	磷含量 P content ($g\cdot kg^{-1}$)	
		籽粒 Grain	秸秆 Straw
玉米 Maize	1.2	4.3	1.3
小麦 Wheat	1.1	3.7	0.7
高粱 Sorghum	1.6	4.4	1.5
谷子 Millet	1.6	4.7	0.9
其他谷物 Other cereals	1.6	5.1	1.3
蔬菜 Vegetables	0	0.6	—
水果 Fruits	0	1.1	—

根据李书田等[20]的研究结果, 将 P_2O_5 折算为 P; 结合山西省实际情况, 水果含磷量为苹果、梨、葡萄和红枣的加权平均值, 蔬菜水果的草/谷比根据山西的情况进行了调整。According to the finding of Li et al.[20], the P_2O_5 content was converted into P content. Combined with the actual situation in Shanxi Province, P content of fruits was the average of the P contents of apple, pear and date. The ratio of straw to grain of fruits and vegetables was adjusted according to the situation in Shanxi Province.

不同动物排泄粪尿的含磷量见表 2; 动物活体各部位的含磷量(表 3)参考 Ma 等[13]的研究结果; 秸秆利用途径及还田比例等参数来源于文献[21]; 粮食饲用比例和粪尿还田比例来源于实地调查和专家咨询。本研究根据山西的实际情况对模型的部分参数和计算过程进行了调整。

表 2 单位畜禽年排磷量[13]
Table 2 P excretion per animal per year of different animals

畜禽 Animal	排磷量 P excretion ($kg\cdot a^{-1}$)
猪 Pig	1.69
奶牛 Dairy cattle	12.92
肉牛 Beef cattle	4.84
役用牛 Draught cattle	5.13
羊 Sheep and goats	1.03
肉禽 Meat poultry	0.02
蛋鸡 Laying hen	0.25

表 3 主要动物活体的产品含磷量[13]
Table 3 P content of production in animal body

动物 Animal	鲜重 Fresh weight (kg)	动物活体质量划分 Partition of animal live weight (%)			含磷量 P content ($g\cdot kg^{-1}$)		
		可食用部分 Edible part	骨头 Bone	其他部分 Other parts	可食用部分 Edible part	骨头 Bone	其他部分 Other parts
猪 Pig	90	50	13	37	1.8	33	0.7
奶牛 Dairy cattle	—	100	—	—	0.9	—	—
肉牛 Beef cattle	477.3	45	20	35	1.7	42	0.1
羊 Sheep and goat	35	55	24	21	1.7	56	1.5
肉鸡 Poultry	2.04	65	20	15	1.6	20	0.1
蛋鸡 Eggs	—	100	—	—	2.1	—	—

—: 无数据。—: no data.

1.5 数据处理及计算方法

本研究使用 NUFER 模型定量分析了山西省农牧生产体系中磷的流动、利用效率和损失途径; 并用 ArcGIS 9.3 计算绘制了相关地理图件。

2 结果与分析

2.1 2011 年山西省各地市农牧体系磷素输入输出空间分布特征

2011 年山西省农田系统投入磷 19.23 万 t; 运城市投入最多, 为 4.62 万 t, 占全省总投入的 24%; 投入最少的为阳泉市, 仅为 0.22 万 t(表 4)。农田体系的磷投入主要来源为肥料, 全省磷肥(含复合肥)占总投入的平均比例为 79.5%; 最高的为运城和临汾, 分别占 87.6%和 83.4%; 最低的为吕梁, 占 66.9%。各区域作物收获带走的磷养分最多的是运城市和临汾市, 分别为 1.93 万 t 和 1.45 万 t; 最少的为阳泉, 为 0.17 万 t。农田磷盈余量多的为运城市, 为 2.69 万 t, 阳泉盈余量最少, 仅为 0.05 万 t; 累积到农田土壤的磷为 9.53 万 t, 最多的为运城市, 达 2.64 万 t, 阳泉市农田土壤磷累积量最少, 仅为 0.05 万 t。从单位面积磷的流量来看(图 2a), 2011 年各地市农田体系氮素单位面积投入量最大的为运城市和晋城市, 分别为 82.96 $kg\cdot hm^{-2}$ 和 74.43 $kg\cdot hm^{-2}$; 最小的为吕梁市, 仅为 22.54 $kg\cdot hm^{-2}$; 表明农田体系的磷投入在区域上存在较大的不平衡, 总体呈现东南部高、西北部低的空间格局。单位面积作物收获磷较多的为运城市、晋城市、阳泉市、晋中市、临汾市和长治市, 均超过 30 $kg\cdot hm^{-2}$; 最少的为吕梁市, 仅为 12.89 $kg\cdot hm^{-2}$; 表明农田体系上作物收获磷也具有很大的空间差异性。运城市和晋城市农田磷盈余量最高, 分别达 48.24 $kg\cdot hm^{-2}$ 和 42.01 $kg\cdot hm^{-2}$; 阳泉市盈余量最小, 仅为 9.39 $kg\cdot hm^{-2}$。单位面积农田土

表 4　2011 年山西省各地市农牧生产体系磷投入及主要流动特征

Table 4　P inputs and major flows characteristics in crop-livestock production systems in different municipalities of Shanxi Province in 2011

×10^4 t

系统 System	项目 Item	太原 Taiyuan	大同 Datong	阳泉 Yangquan	长治 Changzhi	晋城 Jincheng	朔州 Shuozhou	晋中 Jinzhong	运城 Yuncheng	忻州 Xinzhou	临汾 Linfen	吕梁 Lüliang
农田 Crop production	投入合计 Subtotal	0.50	1.35	0.22	1.79	1.41	1.29	1.95	4.62	2.29	2.57	1.24
	化学磷肥投入 P fertilizer input	0.35	0.98	0.15	1.45	1.08	0.94	1.43	4.05	1.88	2.14	0.83
	作物收获 Crop harvest	0.27	0.59	0.17	1.01	0.61	0.67	1.15	1.93	0.97	1.45	0.71
	农田表观盈余 P surpluses	0.23	0.77	0.05	0.79	0.79	0.62	0.80	2.69	1.31	1.12	0.53
	土壤累积 Soil accumulation	0.22	0.75	0.05	0.77	0.78	0.61	0.78	2.64	1.29	1.09	0.52
畜牧 Livestock production	投入合计 Subtotal	0.28	0.69	0.12	0.60	0.59	0.65	0.94	0.98	0.73	0.71	0.74
	饲料进口投入 Imported feed input	0.19	0.45	0.04	0.17	0.33	0.37	0.49	0.22	0.30	0.09	0.43
	本地饲料粮投入 Local feed input	0.09	0.25	0.07	0.43	0.26	0.28	0.45	0.77	0.43	0.62	0.30
	产品产出 Animal harvests	0.03	0.06	0.01	0.04	0.03	0.09	0.07	0.07	0.03	0.04	0.04
总计 Total		0.54	1.42	0.20	1.62	1.41	1.30	1.91	4.27	2.18	2.23	1.26

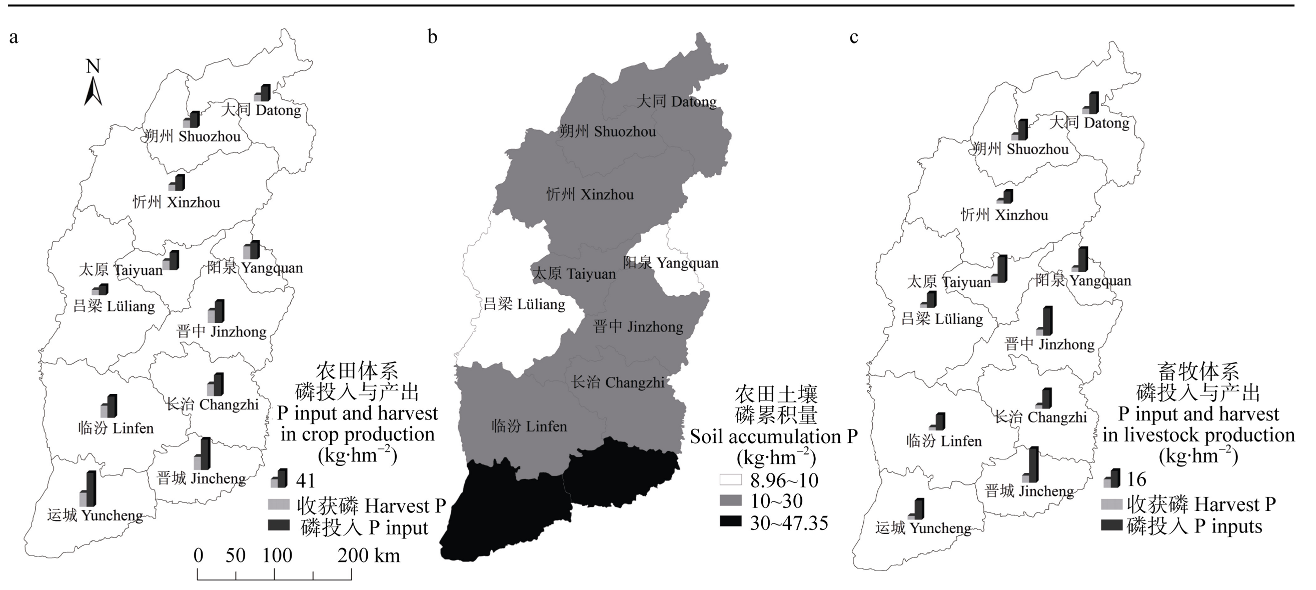


图 2　2011 年山西省各地市农田生产系统单位面积磷素投入与产出(a)、农田单位面积土壤磷累积量(b)和畜牧系统单位面积磷素投入与产出(c)

Fig. 2　Amount of P inputs and products per hacter arable land in crop production system (a), accumulation of P in soil per hacter arable land (b), amounts of P inputs and products per hacter arable land in livestock production system (c) from different municipalities of Shanxi Province in 2011

壤累积磷最高为运城市(47.35 kg·hm^{-2})和晋城市(41.22 kg·hm^{-2})，最低的为阳泉市(8.97 kg·hm^{-2})(图 2b)。

由表 4 可见，2011 年山西省畜牧体系磷投入在空间上也存在很大的差异，投入最多的为运城市和晋中市，分别为 0.98 万 t 和 0.94 万 t，投入最少的为阳泉市，仅为 0.12 万 t；本地饲料磷供应量最高的运城为 0.77 万 t，阳泉最低为 0.07 万 t；外源饲料磷需求最多的晋中为 0.49 万 t，最少的阳泉仅为 0.04 万 t；动物主产品(肉、蛋、奶)带走的磷最多的朔州为 0.09 万 t，最少的阳泉仅为 0.01 万 t。2011 年山西省不同地市畜牧生产体系单位面积磷素流动数量表现为：磷投入最多的晋城为 31.25 kg·hm^{-2}，最小的忻州为 11.11 kg·hm^{-2}；动物主产品磷最高的为朔州市和太原市，均为 2.40 kg·hm^{-2}，最低的忻州市仅为 0.51 kg·hm^{-2}；投入在总体上呈现东北部高于西南部的格局(图 2c)。

在整个农牧体系中，全省磷投入量为 18.34 万 t,

运城市投入最多为 4.27 万 t，阳泉市投入最少为 0.20 万 t；畜牧生产体系投入占整个农牧生产体系投入比重大于 50%的有阳泉(60.0%)、吕梁(58.7%)、太原(51.9%)和朔州(50.0%)，比重最低的为运城市(23%)；在畜牧生产体系中，外源饲料磷占总投入的比重较高的有太原(67.8%)、大同(65%)、吕梁(58%)和朔州(56.9%)，比重较低的为运城市(22.4%)和临汾市(12.7%)。

2.2　2011 年山西省各地市农牧体系有机废弃物磷资源量及循环利用空间分布特征

2011 年山西省农牧生产体系有机废弃物的磷资源量为 6.71 万 t，实现循环利用(秸秆、畜禽粪尿的还田以及秸秆作为动物饲料)的有 4.35 万 t (表 5)；2011 年山西农田生产系统中作物秸秆产生的磷为 1.32 万 t，最多的运城市为 0.26 万 t，最少的阳泉市仅有 0.02 万 t，全省秸秆用于农田系统的还田和畜牧系统的饲料为 0.79 万 t，占比 60%；山西省畜禽粪尿产生的磷为 5.39 万 t，运城最多为 0.79 万 t，阳泉最少为 0.09 万 t；畜禽粪尿进入农田生产体系还田比例最高的为朔州市为 73%，阳泉最小为 62%。

从单位耕地面积有机废弃物的磷承载量来看，晋城最高，为 29.32 kg·hm^{-2}；忻州最低，为 10.41 kg·hm^{-2}；全省平均水平为 18.24 kg·hm^{-2}(图 3)。从畜禽粪尿磷的单位面积承载量来看，仍然是晋城最高(24.73 kg·hm^{-2})，忻州最低(8.22 kg·hm^{-2})，全省平均水平为 14.82 kg·hm^{-2}。

表 5　2011 年山西省农牧生产体系有机废弃物磷资源量

Tabel 5　P amounts in organic residues of crop-livestock production systems in different municipalities of Shanxi Province in 2011　×10^4 t

数量 Amount	项目 Item	太原 Taiyuan	大同 Datong	阳泉 Yangquan	长治 Changzhi	晋城 Jincheng	朔州 Shuozhou	晋中 Jinzhong	运城 Yuncheng	忻州 Xinzhou	临汾 Linfen	吕梁 Lüliang
磷素资源量 P amount	秸秆 Straw	0.03	0.08	0.02	0.14	0.09	0.09	0.15	0.26	0.14	0.21	0.10
	畜禽粪尿 Manure	0.21	0.51	0.09	0.48	0.48	0.45	0.73	0.79	0.54	0.56	0.57
	合计 Total	0.24	0.59	0.11	0.62	0.57	0.54	0.88	1.05	0.68	0.77	0.67
可利用磷素数量 Usable P amount	秸秆 Straw	0.02	0.05	0.01	0.09	0.05	0.06	0.09	0.15	0.09	0.12	0.06
	畜禽粪尿 Manure	0.14	0.35	0.06	0.30	0.30	0.33	0.47	0.50	0.36	0.37	0.38
	合计 Total	0.16	0.40	0.07	0.39	0.35	0.39	0.56	0.65	0.45	0.49	0.44

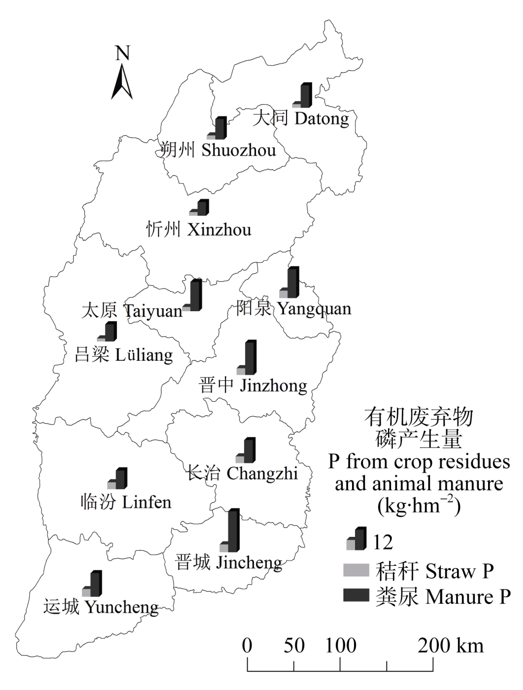


图 3　2011 年山西省各地市农牧生产体系单位面积有机废弃物中磷素承载量

Fig. 3　Amounts of P from crop residues and animal manure for per ha arable land of different municipalities in Shanxi Province in 2011

2.3　2011 年山西省各地市农牧体系磷利用效率空间分布特征

2011 年山西省农田生产体系磷的利用效率(PUEc)平均水平为 45.6%；阳泉市最高，为 65.8%；运城和忻州最低，为 36.3%。畜牧生产体系磷的利用效率(PUEa)平均水平为 7.6%；朔州市最高，为 13.5%；忻州市最低，为 4.8%。磷在整个农牧耦合生产体系的利用效率(PUEc+a)平均水平为 30.3%，较高的地市有阳泉(45.0%)、太原(34.6%)、晋中(34.4%)、朔州(31.7%)和长治(32.3%)，最低为忻州(22.0%)，见图 4。

2.4　山西省各地市磷损失空间分布特征及损失途径分析

磷在土壤中的移动性较差，在农田生产系统，磷的主要损失途径为土壤侵蚀与径流，有很小的一部分通过淋洗损失，在畜牧生产系统，主要是粪尿的直接排放。由表 6 可知，2011 年全省农牧生产体系损失磷共计 2.04 万 t，占整个农牧生产体系投入的 11%，损失较多的地市为运城(0.35 万 t)、晋中(0.28 万 t)，最少的为阳泉(380.7 t)。从单位面积的损失途径

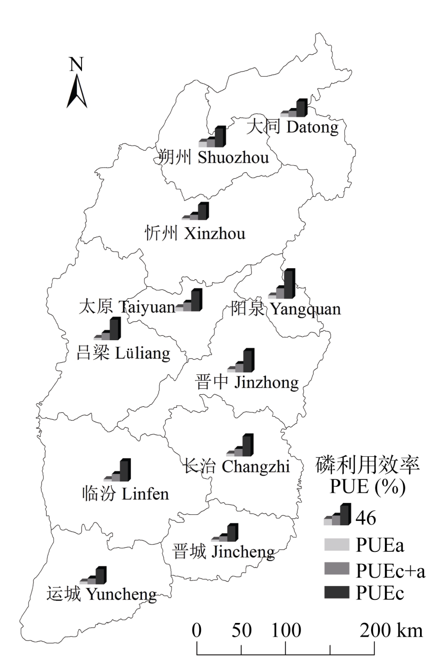


图 4　2011 年山西省各地市农田生产体系(PUEa)、畜牧生产体系(PUEc)和农牧耦合生产体系(PUEc+a)的磷利用效率

Fig. 4　P use efficiency (PUE) of crop production system (PUEa), livestock production system (PUEc) and crop-livestock production system (PUEc+a) of different municipalities in Shanxi Province in 2011

可以看出(图 5)，各地市损失主要来自动物的畜禽粪尿，晋城最大(8.8 kg·hm^{-2})，忻州最小(2.7 kg·hm^{-2})。

3　讨论

3.1　山西省农牧生产体系磷素流动的空间变异特征

山西省农田生产系统中单位农田面积磷的投入与产出整体空间分布特征表现为，东南部高、西北部低(图 2a)，这与山西的地理特征、气候特征、耕地资源分布(图 6a)、耕作制度等因素密切相关，山西地理特征呈现南北长、东西窄的平行四边形格局，南北跨度有 6 个纬度，使得南北的气候条件差异较大，无霜期南长北短[22]，因此省域南部的农业生产条件较为优越，尤其是运城、临汾，种植制度以“冬小麦–夏玉米”轮作为主，历来都是我省重要的粮食产区，2011 年粮食产量占全省粮食总产的 40.3%[19]，是山西省“南粮北调”、保障山西粮食安全的重要基地，因此磷的投入较高; 11 个地市农田磷平衡表现为不同程度的盈余，但区域间变异程度较大(表 4)，这与冀宏杰等[23]对全国的研究结果相似，盈余量较高区集中在省域南部的粮食主产区，阳泉市盈余极少。陈明昌等[24]指出，从 20 世纪 80 年代以来，山西农田生产系统的磷在土壤中开始大量累积，但阳泉(平定县)是一个例外，这与本文的研究结果相互印证。

表 6　2011 年山西省各地市农牧生产体系磷损失分析

Table 6　Patterns of P losses in crop-livestock production system of different municipalities in Shanxi Province in 2011　t

系统 System	损失途径 Loss way	太原 Taiyuan	大同 Datong	阳泉 Yangquan	长治 Changzhi	晋城 Jincheng	朔州 Shuozhou	晋中 Jinzhong	运城 Yuncheng	忻州 Xinzhou	临汾 Linfen	吕梁 Lüliang
农田 Crop production	径流及侵蚀 Runoff and erosion	50.0	135.5	22.1	179.4	140.6	129.4	194.8	462.2	228.2	256.8	123.7
	淋洗 Leaching	2.5	8.5	0.5	8.6	8.8	6.9	8.8	29.7	14.5	12.3	5.8
畜牧 Livestock production	直接排放 Discharge	687.7	1 540.0	358.1	1 777.5	1 658.0	1 213.6	2 547.4	2 959.2	1 771.6	1 983.6	1 861.2
总计 Total		740.2	1 684.0	380.7	1 965.5	1 807.4	1 349.9	2 751.0	3 451.1	2 014.3	2 252.7	1 990.7

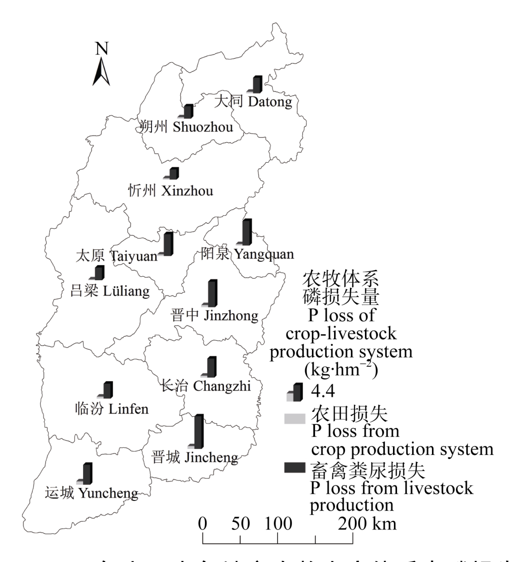


图 5　2011 年山西省各地市农牧生产体系中磷损失量

Fig. 5　Amounts of P losses per hectare arable land in crop-livestock production system of different municipalities in Shanxi Province in 2011

除了受自然、地理因素的影响外，主要和近些年的政策影响关系较为密切，山西省政府先后通过建设雁门关生态畜牧经济区、实施“畜牧振兴计划”等一系列政策来推动集约化畜牧业发展，使得山西畜牧空间分布特征明显，导致畜牧生产系统单位农田面积磷投入也不均衡(图 2c)，呈现东北部高于西南部的格局，晋城最高而忻州最低，这是由于晋城是山西最大的生猪养殖区，2011 年生猪出栏 144.4 万头，占全省生猪出栏的 17.3%[19]，而耕地资源相对其他地市较为紧缺(图 6a)，畜禽养殖密度最高(图 6b)；由表 4 可知朔州市动物主产品带走的磷最多，达 900 t，表明朔州畜牧生产系统的产能最高，是因为朔州是山西主要的奶牛养殖基地，也是伊利、蒙

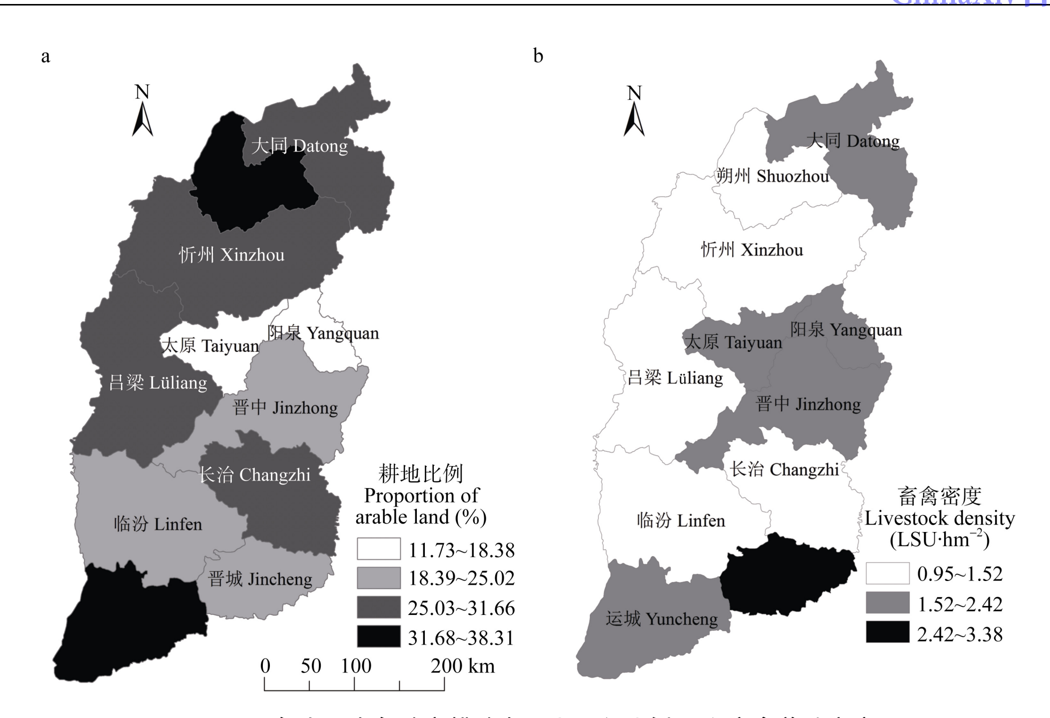


图 6 2011 年山西省各地市耕地占国土面积比例(a)和畜禽养殖密度(b)

Fig. 6 Proportion of arable land (a) and the density of livestock (b) from 11 municipalities in Shanxi Province, 2011

畜牧单位(LSU, livestock unit)采用欧盟统计局折算方法[25], 将奶牛作为标准单位, 1 头肉牛或者役用牛折算 0.8 头奶牛, 1 头猪折算 0.3 头奶牛, 1 只肉鸡折算 0.007 头奶牛, 1 只蛋鸡折算 0.014 头奶牛, 1 只羊折算 0.1 头奶牛。用单位耕地面积的畜禽养殖量来反映畜禽养殖密度。Livestock unit (LSU) was defined with the conversion method of Eurostat[25]. With dairy cattle as the standard unit, a beef cattle or draught cattle was converted to 0.8 dairy cattle, a pig was converted to 0.3 dairy cattle, a poultry was converted to 0.007 dairy cattle, a layer was converted to 0.014 dairy cattle, a sheep or goat was converted to 0.1 dairy cattle. Livestock density was livestock amount for per hectare arable land.

牛等牛奶企业的重要奶源基地, 养殖水平较高, 2011 年牛奶产量占全省总产的 41.6%[19]。

3.2 山西省农牧生产体系磷流动存在的问题及建议

2011 年山西省畜禽粪尿磷的平均单位耕地面积承载量为 14.8 kg·hm^{-2}, 低于 Oenema 等[26]给出的土壤粪肥施磷量的限值(35 kg·hm^{-2}), 整体上农田负荷较小, 晋城粪尿磷耕地承载量为 24.7 kg·hm^{-2}, 考虑到分布的不均衡, 应注意该地区粪尿磷排放对环境的潜在风险。

2011 年山西省磷在农田生产体系的利用效率(PUEc)为 45.6%, 高于 2010 年全国平均水平的 37%[3], 是因为山西的磷肥投入在全国处于一个较低水平[27]; 磷在畜牧生产体系的利用效率(PUEa)很低, 仅为 7.6%, 低于全国平均水平(17%)[3], 是由于山西的役用动物所占比重较大; 磷在整个农牧生产体系的利用效率(PUEc+a)较低, 全省平均水平仅为 30.3%, 是由于农牧生产体系中大量的作物秸秆和畜禽粪尿等有机废弃物未得到回收利用, 全省有机废弃物的回收利用率仅为 60%(表 5), 笔者在晋东南走访时发现, 仍有为数不少的农户在露天焚烧秸秆, 究其原因, 增加投入、影响耕作和政府补贴不到位是主要限制因素。此外, 随着畜牧养殖由传统养殖向规模化、集约化方式转变, 大量的畜禽粪尿未能及时进入农田[28], 山西虽然养殖总量不大, 但集约化程度较高[18], 因此要提高磷的利用效率同时避免环境风险, 需要关注秸秆和畜禽粪尿的问题。

山西农牧生产体系中的磷损失主要来自动物的畜禽粪尿(图 5), 结合图 6 可知, 单位面积的磷损失与畜禽养殖密度密切相关, 晋城、晋中单位面积损失最高, 除了畜禽养殖密度高之外, 可能是因为肉猪和蛋鸡生产体系对环境造成的污染风险较其他畜禽生产体系大[29]。晋城拥有较多的粪尿资源, 可作为周边运城、临汾等粮食主产区的养分来源, 既解决了当地的养分需求, 减少化肥投入, 又可以降低当地的环境风险, 与此类似, 太原、晋中等也可以为周边地市提供养分。

在今后农牧生产体系中磷的管理过程中应: 1)提高有机废弃物料的循环利用效率, 政府、科研院所在推广秸秆、粪尿回收利用技术上要切实做到节本增效, 可操作性强; 2)合理规划种植业、畜牧业的布局, 重点加强畜牧生产中磷素养分的管理, 减少其对环境的潜在风险, 并确保农牧生产体系间的养分流量、流向合理匹配; 3)实现区域间养分协同管理。

3.3 研究局限性及今后研究建议

统计年鉴数据作为宏观研究的惟一数据来源, 存在一定的不确定性[29]。本文在研究过程中通过参阅历年《山西省统计年鉴》、《山西省农业统计年鉴》和山西省各地市统计公报等资料来综合验证, 尽量确保基础数据的可靠性。

对于农作物收获物和秸秆的养分含量, 以及作物草谷比等研究所需的参数, 李书田等[20]在综述了大量文献资料后, 用于估算全国的农田养分平衡, 其结果较为可靠, 因此本研究也采用了这一参数。而就畜禽活体各部分及其粪尿的排泄系数, Ma 等[13,16]在总结前人工作的基础上, 确定了一套较为成熟的参数, 本文也引用了这一成果, 以确保研究结果不出大的偏差。随着国家今后对肥料使用总量的控制[30]和对集约化养殖过程中粪尿资源的排放约束[8], 国家和区域尺度农牧结合的养分流动估算会成为一个热点。因此, 在今后应建立较为权威的分区域农作物体系的参数, 来修正对于不同气候和环境带来的差异, 而对于畜牧体系, 则建议以饲料摄入量为依据对粪尿养分量进行科学的估算, 来代替当前常用的粪尿排泄系数法, 这也是当前欧美国家常用的方法。

4 结论

山西省农牧生产体系磷流动空间分布特征明显, 主要受地理位置、气候特征和政策引导的共同影响。农田生产系统磷投入、产出与损失总体均呈现南高北低的空间分布特征, 畜牧生产体系的磷流动空间分布特征较为复杂, 但整体磷的投入和损失呈现东部高于西部的空间分布特征。

和全国平均水平相比, 山西农田生产系统的磷投入较低, PUEc 高于全国平均水平; 但畜牧生产系统中役用动物的比例较高, 使得 PUEa 低于全国平均水平, 农牧分离严重, 加之畜牧养殖集约化程度较高, 有机废弃物循环利用较低, 导致 PUEc+a 较低。

山西省农牧生产体系中磷的整体损失程度较低, 但区域间差异很大, 晋东南的地市存在潜在的环境风险, 今后应进一步加强农牧耦合程度、提高有机废弃物的循环利用效率; 同时在区域间实现养分资源的协同管理, 是实现山西省农业可持续发展的必由之路。

参考文献 References

[1] Smil V. Phosphorus in the environment: Natural flows and human interferences[J]. Annual Review of Energy and the Environment, 2000, 25: 53–88

[2] UN (United Nations). World population prospects: The 2008 revision population database[R]. 2010

[3] Bai Z H, Ma L, Ma W Q, et al. Changes in phosphorus use and losses in the food chain of China during 1950–2010 and forecasts for 2030[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2015: 1–12, doi: 10.1007/s10705-015-9737-y

[4] Chen M, Chen J, Sun F. Agricultural phosphorus flow and its environmental impacts in China[J]. Science of the Total Environment, 2008, 405(1/3): 140–152

[5] Conley D J, Paerl H W, Howarth R W, et al. Ecology. Controlling eutrophication: Nitrogen and phosphorus[J]. Science, 2009, 323(5917): 1014–1015

[6] Devendra C. Perspectives on animal production systems in Asia[J]. Livestock Science, 2007, 106(1): 1–18

[7] 王方浩, 马文奇, 窦争霞, 等. 中国畜禽粪便产生量估算及环境效应[J]. 中国环境科学, 2006, 26(5): 614–617
Wang F H, Ma W Q, Dou Z X, et al. The estimation of the production amount of animal manure and its environmental effect in China[J]. China Environmental Science, 2006, 26(5): 614–617

[8] 中华人民共和国中央人民政府. 中华人民共和国国务院令第 643 号: 畜禽规模养殖污染防治条例[EB/OL]. [2013-11-26]. http://www.gov.cn/zwgk/2013-11/26/content_2534836.htm
The Central People's Government of the People's Republic of China. People's Republic of China State Council Order No.643: Intensive livestock and poultry breeding pollution prevention and control regulations[EB/OL]. [2013-11-26]. http://www.gov.cn/zwgk/2013-11/26/content_2534836.htm

[9] 黄和平, 毕军, 张炳, 等. 物质流分析研究述评[J]. 生态学报, 2007, 27(1): 368–379
Huang H P, Bi J, Zhang B, et al. A critical review of material flow analysis (MFA)[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(1): 368–379

[10] Ma W Q, Li J H, Ma L, et al. Nitrogen flow and use efficiency in production and utilization of wheat, rice, and maize in China[J]. Agricultural Systems, 2008, 99(1): 53–63

[11] Wang F, Sims J T, Ma L, et al. The phosphorus footprint of China's food chain: implications for food security, natural resource management, and environmental quality[J]. Journal of Environmental Quality, 2011, 40(4): 1081–1089

[12] 马林, 魏静, 王方浩, 等. 基于模型和物质流分析方法的食物链氮素区域间流动——以黄淮海区为例[J]. 生态学报, 2009, 29(1): 475–483
Ma L, Wei J, Wang F H, et al. Nitrogen flow in food chain among regions based on MFA and model: A case of Huang-Huai-Hai Plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(1): 475–483

[13] Ma L, Ma W Q, Velthof G L, et al. Modeling nutrient flows in the food chain of China[J]. Journal of Environmental Quality, 2010, 39(4): 1279–1289

[14] Hou Y, Ma L, Gao Z L, et al. The driving forces for nitrogen and phosphorus flows in the food chain of China, 1980 to 2010[J]. Journal of Environmental Quality, 2013, 42(4): 962–971

[15] Bai Z H, Ma L, Qin W, et al. Changes in pig production in china and their effects on nitrogen and phosphorus use and losses[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(21): 12742–12749
[16] Ma L, Guo J H, Velthof G L, et al. Impacts of urban expansion on nitrogen and phosphorus flows in the food system of Beijing from 1978 to 2008[J]. Global Environmental Change, 2014, 28: 192–204
[17] 刘耀宗, 张经元. 山西土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 84–92
Liu Y Z, Zhang J Y. Shanxi Soil[M]. Beijing: Science Press, 1992: 84–92
[18] 山西省人民政府. 畜牧产业规模化山西达到 47%. 山西日报[EB/OL]. [2015-11-16]. http://www.shanxigov.cn/n16/n8319541/n8319657/n8324722/18069927.html
Shanxi Provincial People's Government. The ratio of the intensive livestock industry in Shanxi Province reached 47%. China Technology Market News[EB/OL]. [2015-11-16]. http://www.shanxigov.cn/n16/n8319541/n8319657/n8324722/18069927.html
[19] 山西省统计局. 山西统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012
Shanxi Statistic Bureau. Shanxi Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2012
[20] 李书田, 金继运. 中国不同区域农田养分输入、输出与平衡[J]. 中国农业科学, 2011, 44(20): 4207–4229
Li S T, Jin J Y. Characteristics of nutrient input/output and nutrient balance in different regions of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(20): 4207–4229
[21] 杜艳萍. 山西省农作物秸秆资源化利用现状及发展对策[J]. 农业环境与发展, 2013(3): 38–41
Du Y P. Current status of crop residues resource utilization in Shanxi Province and development strategies[J]. Agro-Environment and Development, 2013(3): 38–41
[22] 范晓辉, 王麒翔, 王孟本. 山西省近 50 年无霜期变化特征研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(10): 2393–2397
Fan X H, Wang Q X, Wang M B. Variations in frost-free period in Shanxi Province, China: 1959–2008[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(10): 2393–2397
[23] 冀宏杰, 张怀志, 张维理, 等. 我国农田磷养分平衡研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(1): 1–8
Ji H J, Zhang H Z, Zhang W L, et al. Research progress on cropland phosphorus balance in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(1): 1–8
[24] 陈明昌, 张强, 程滨, 等. 山西省主要农田施肥状况及典型县域农田养分平衡研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(4): 1–5
Chen M C, Zhang Q, Cheng B, et al. Fertilizer application survey and farmland nutrient balance of representative counties in Shanxi Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(4): 1–5
[25] Eurostat. Glossary: Livestock unit (LSU)[EB/OL]. [2015–11-16]. http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Glossary:Livestock_unit_(LSU)
[26] Oenema O, van Liere L, Plette S, et al. Environmental effects of manure policy options in the Netherlands[J]. Water Science and Technology, 2004, 49(3): 101–108.
[27] 刘钦普. 中国化肥投入区域差异及环境风险分析[J]. 中国农业科学, 2014, 47(18): 3596–3605
Liu Q P. Distribution of fertilizer application and its environmental risk in different provinces of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(18): 3596–3605
[28] Wang F H, Dou Z X, Ma L, et al. Nitrogen mass flow in china's animal production system and environmental implications[J]. Journal of Environmental Quality, 2010, 39(5): 1537–1544
[29] 许俊香, 刘晓利, 王方浩, 等. 我国畜禽生产体系中磷素平衡及其环境效应[J]. 生态学报, 2005, 25(11): 2911–2918
Xu J X, Liu X L, Wang F H, et al. Phosphorus balance and environmental effect of animal production in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(11): 2911–2918
[30] 农业部种植业管理司. 农业部关于印发《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》和《到 2020 年农药使用量零增长行动方案》的通知[EB/OL]. [2015-03-18]. http://www.moa.gov.cn/zwllm/tzgg/tz/201503/t20150318_4444765.htm
Planting Industry Department of the Ministry of Agriculture. Notice of the Ministry of Agriculture on the issuance of "The Action Plan of Zero Increasing of Fertilizer Use by 2020" and "The Action Plan of Zero Increasing Pesticide Use by 2020". [EB/OL]. [2015-03-18]. http://www.moa.gov.cn/zwllm/tzgg/tz/201503/t20150318_4444765.htm